



TITLE:

場の理論と臨界現象(5.物性物理学
とその広がり,学問の系譜-アイン
シュタインから湯川・朝永へ-)

AUTHOR(S):

佐々, 真一; 川上, 則雄

CITATION:

佐々, 真一 ...[et al]. 場の理論と臨界現象(5.物性物理学とその広がり,学問の系譜-アインシュタインから湯川・朝永へ-). 物性研究 2006, 86(3): 378-393

ISSUE DATE:

2006-06-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/110513>

RIGHT:

[物性物理学とその広がり]

座長: 佐々 真一

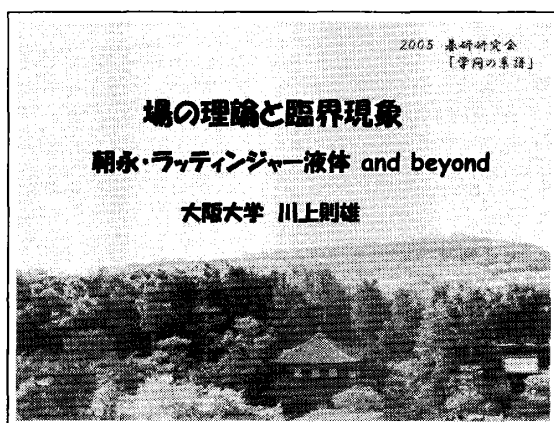
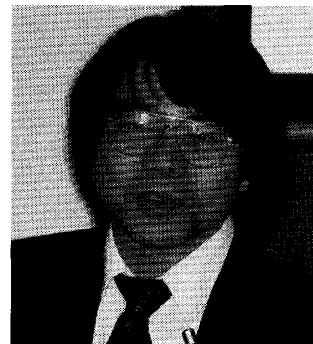
場の理論と臨界現象

川上 則雄

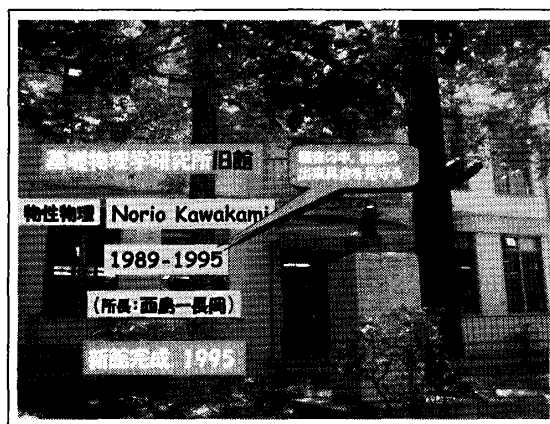
このたび、このような興味深い研究会にご招待頂きましてどうもありがとうございます。ここで講演できることをたいへん光栄に思っております。今日は物性物理の話題ということで、朝永・Luttinger 液体という話をします。30 分くらい話す予定ですので、早口になるかもしれませんが、よろしくお願いします。

私自身は、基研に 1989 年から 6 年半位いました。その最後の年が、ちょうど新館が建つ年にあたりました。完成直前に出て行くことになり新館に入ることができなくて少し残念だったのですが、基礎物理学研究所には特別な思いがあります。こういったよい環境を与えて頂きました湯川先生には、個人的にもたいへん感謝しております。また、基研に在職していた時に行っていた仕事が朝永先生にまつわるテーマでしたので、このお 2 人の大先生には間接的ではありますがたいへんお世話になりました。

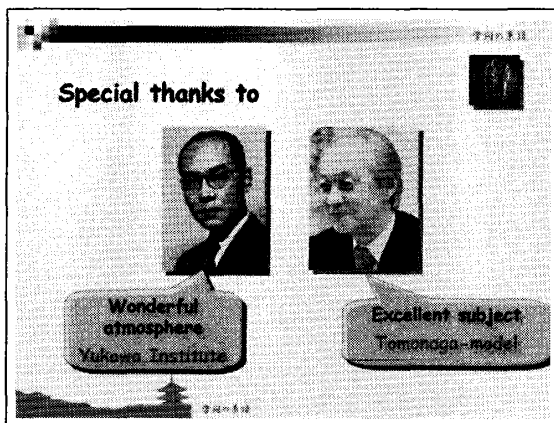
その当時、共同研究を素粒子の梁さんで行っていたのですが、何年か前に亡くなられました。みなさんご存じだと思いますが、この基研の 1 階のラウンジがお茶を飲むスペースになっており、我々の共同研究の場所でもありました。今日の話題は、梁さんで行っていた研究がベースになっています。



[Slide 01]



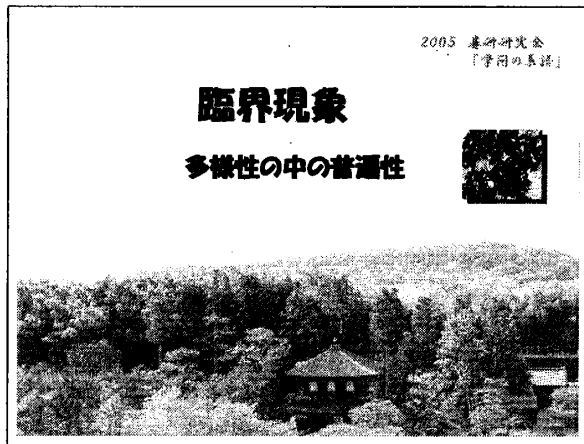
[Slide 02]



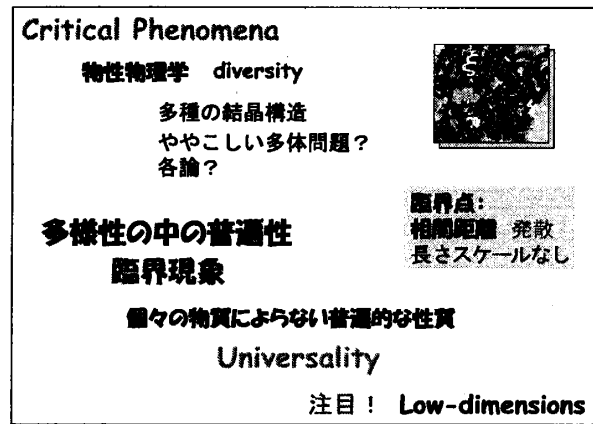
[Slide 03]



[Slide 04]

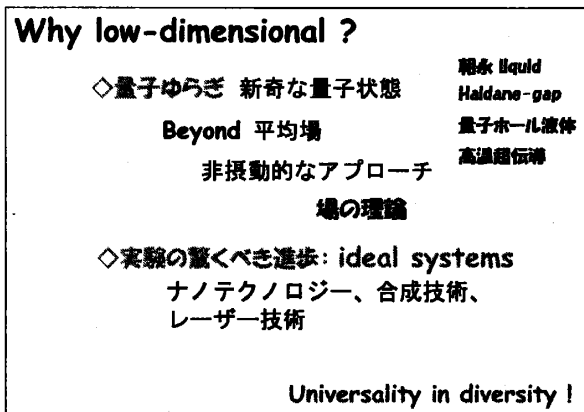


[Slide 05]

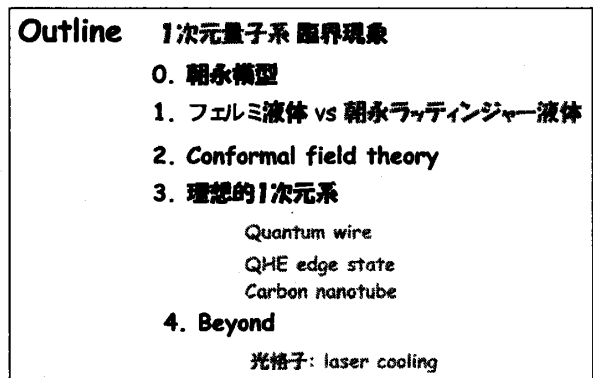


[Slide 06]

[slide 5,6,7] さて本題に戻り、臨界現象の話から始めます。物性物理は多様性があることを特徴としていますが、その中でも普遍的な性質が現れます。その典型例が臨界現象です。物性物理学の多様性は、ともすると複雑な結晶構造を伴ったややこしい多体問題で、いわゆる各論ではないかと言われることがあります。先ほど言いましたように、そうした中にも臨界現象のような普遍的な性質が見られることが重要です。相転移が起こる臨界点では相関距離が無限大になりますので、長さに対するスケールがなくなります。そうすると、個々の細かい結晶構造などはあまり重要でなくなり、その結果として普遍的な性質が見られることになります。その中で、近年特に低次元の臨界現象に興味を持たれているわけです。その理由の一つとして、低次元では量子ゆらぎがたいへん大きくなっているのです。様々な新しい量子状態が実現するのではないかと期待されることが挙げられます。理論的には平均場を超えるような非摂動的なアプローチが必要となり、特に場の理論などが有効な理論手法となります。低次元系に対してこれまでにいろいろな概念が提出されていまして、よく知られている朝永・Luttinger 液体とか、Haldane-gap とか、量子ホール液体、高温超伝導などなど、多くのものがあります。こういった話題というのは、実験技術の大きな進歩に支えられてきたものです。例えば、ナノテクノロジー、物性合成の技術、レーザー技術などを駆使した実験が大きく発展したことによって、多様性の中に普遍的な性質が実際に観測されるようになってきているわけです。

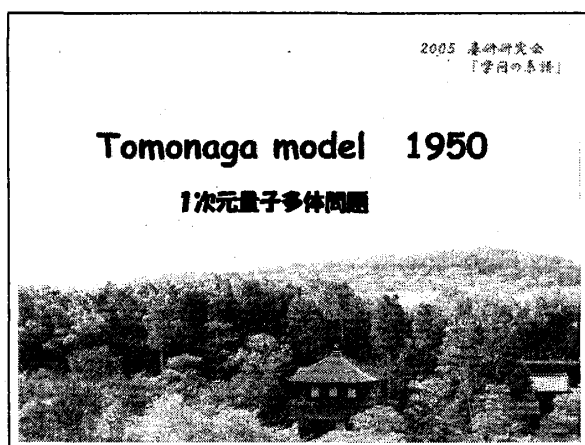


[Slide 07]

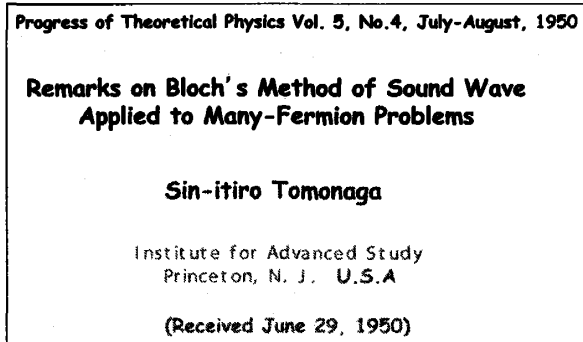


[Slide 08]

[slide 8] ここでお話しますのは、そのような臨界現象の中で特に1次元量子系についての話題です。最初に朝永モデルについて簡単にふれた後、朝永・Luttinger 液体がフェルミ液体とどのように違うかということを説明します。その後、前者の基礎を与える conformal field theory について手短かに述べた後に、実験の話をして、最後に関連する話題として最近の laser cooling と光格子を取り上げます。

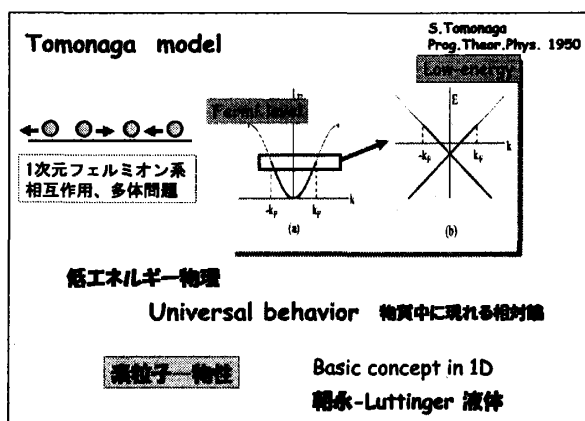


[Slide 09]

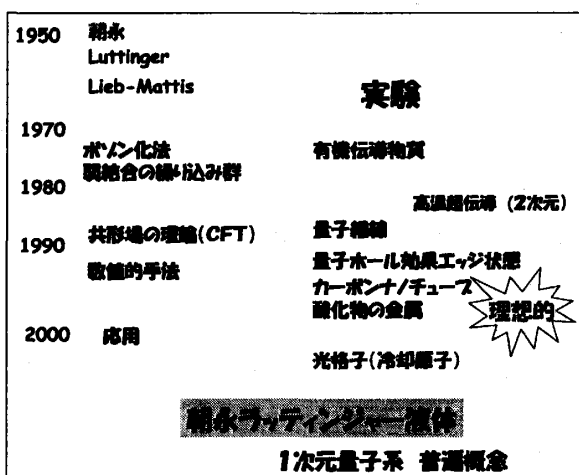


[Slide 10]

[slide 9,10,11] 朝永先生の論文というのは1950年に発表されました。みなさんご存じかもしれませんが「Remarks on Bloch's Method of Sound Wave Applied to Many-Fermion Problems」というタイトルで、プリンストンにおられた時に日本の「Progress」誌に投稿されたものです。その内容をポンチ絵で書くと、このようなものになっています。いま1次元のフェルミ系を考えて、フェルミオン間の相互作用を導入します。フェルミ系の多体問題ということなので、パウリの原理に従って下から電子をどんどん詰めていくと、フェルミ面まで電子が詰まります。物性物理でわれわれが通常観測するようなエネルギースケールだと、フェルミ面付近の低エネルギー励起だけが効いてきます。そこで、この付近でエネルギー分散を線形化してやります。実は、このような低エネルギー励起には、個々の物質の詳細にはよらないようなユニバーサルな振る舞いが現れることになります。このモデルが現在、朝永・Luttinger液体と呼ばれているもので、1次元量子多体系の基本概念となっています。1950年という早い時期に、物性物理の問題を場の理論の方法で扱うという先駆的な仕事が既になされていたわけです。



[Slide 11]



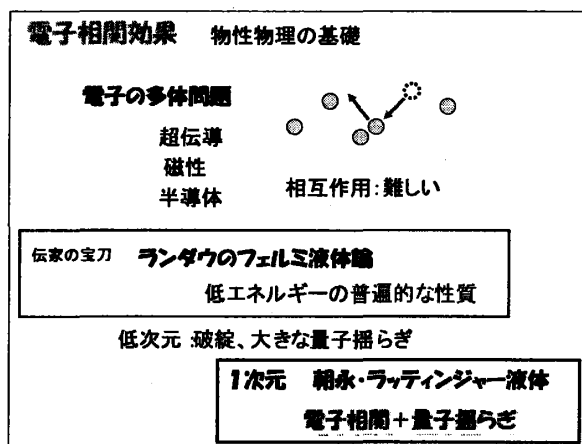
[Slide 12]

[slide 12] その後、Luttinger とか Lieb-Mattis によって基本的な仕事がされました。1970年代、物性ではボゾン化法とか弱結合の繰り込み群の研究が精力的に行われました。さらに1990年前後に共形場理論や数値的手法を用いることで、朝永・Luttinger液体のさらなる理解が進みました。最近では、種々の系への応用研究が行われています。1950年ごろには、もちろん実験はほとんどありませんでしたが、1970年代になると有機伝導物質の研究が盛んに行われるようになり、それほど1次元性はよくないのですが、有機伝導物質が準1次元系の例として研究されてきました。また、1986年には高温超伝導が発見されました。これは2次元の強相関電子系なのですが、結果として1次元強相関電子系の研究を活性化することになりました。その前後で、理想的とみなされるような1次元系がたくさん出てきました。最近では、光格子を使って冷却原子で1次元系を人工的につくることも可能に

なっています。このように朝永先生の実験的な研究から出発した多体問題が、今、物性物理の大きな研究テーマとなっているわけです。

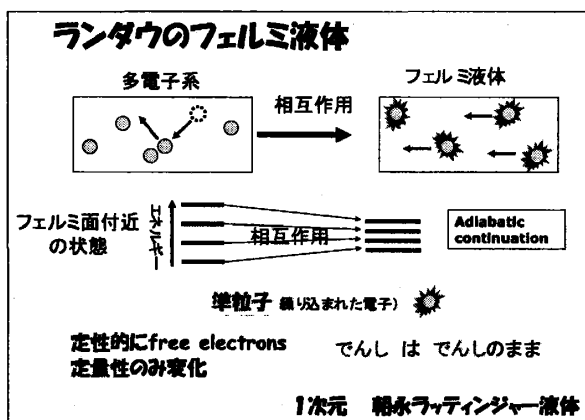


[Slide 13]

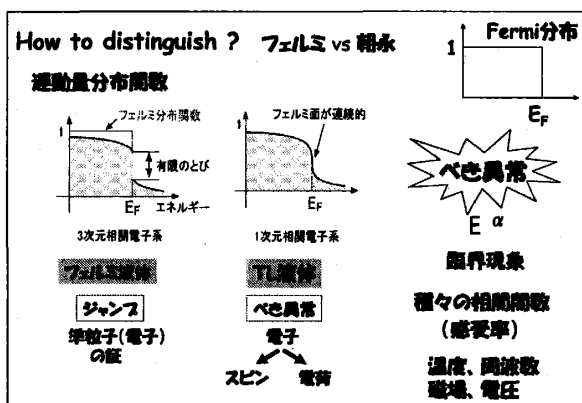


[Slide 14]

[slide 13,14] さて、朝永・Luttinger 液体というのは、通常の Fermi 液体と何が違うかということについて少し述べます。われわれが興味を持っている電子相関効果というのは物性物理の基礎的な問題なのですが、電子の多体問題を扱わなければならないので、たいへんややこしい問題となっています。それを扱うための理論的な枠組みが、ランダウの Fermi 液体論と呼ばれているもので、固体電子論の基礎を与えるものです。これは、電子系の低エネルギーの普遍的な性質に注目し記述するという枠組みです。先ほど言いましたように、低次元になると量子ゆらぎが大きくなってきますので、ランダウの Fermi 液体の考え方は使えなくなります。特に 1 次元の場合は、Fermi 液体は破綻しそれに代わって朝永・Luttinger 液体となります。そこでは、電子相関に加えて量子揺らぎの効果まで正確に考える必要があります。



[Slide 15]



[Slide 16]

[slide 15] まず、ランダウの Fermi 液体は何だったかということを簡単に復習します。多電子系を考えて、これに相互作用をゆっくりと入れていくと自由電子からフェルミ液体に移り変わります。これはどういうことを表しているかというと、例えば Fermi 面付近の状態を見た時に、相互作用を入れたとしても、実は相互作用のある場合とない場合のスペクトラムが 1 : 1 に対応しているというものです。これは adiabatic continuation プリンシプルと呼ばれているものです。すなわち、電子は電子の性質を保ったまま繰り込まれて、「準粒子」と呼ばれるものになります。この意味するところは、準粒子は定性的には自由電子と同じであり、その定量性のみ変化するということです。すなわち、繰り込まれた準粒子は Fermi 統計に従う電子のままであるというのが、ランダウの Fermi 液体の骨子であります。一方、1 次元系の朝永・Luttinger 液体では、相互作用がいったん入ると、電子は電子のままであるとはよろしくないということになります。

[slide 16] では、どのように Fermi 液体と朝永・Luttinger 液体というのを区別したらよろしいかと

いうことです。これに関して分かりやすい物理量が、スライドの一番右端に描いた Fermi 分布関数です。自由電子系で電子を下から詰めていくと、フェルミ面まで1つずつレベルが占有されます。そして、占有確率はフェルミ面で1から急にジャンプしてゼロに落ちます。この自由電子系に相互作用を入れていくと、Fermi 分布に対応する占有確率は大きく影響をうけて関数をごちゃごちゃになりそうです。ちなみに、相互作用が入った場合、この占有確率を「運動量分布関数」と呼ぶのが慣わしです。上のナイーブな憶測に反して、運動量分布関数は特異な様相を呈します。すなわち、占有確率が大きく変化するところもあるのですが、フェルミ面に注目すると、少々とびの値は小さくなるものの必ずジャンプが残ってしまいます。このようにフェルミ面に必ずジャンプが残ってしまうことが、フェルミ統計性を直接反映した帰結です。電子が繰り込まれた準粒子は、電子としての性質を保持しているという証になっているわけです。一方、1次元はどうなっているかということ、量子揺らぎが大きいので、こういったジャンプは全くなされてしまっ、フェルミ面の運動量分布の振る舞いは微係数が発散する「べき異常」を示します。ですから、この場合電子というのはよい状態ではなくなっています。実は、電子のスピンの電荷が分離した状態がよいモードになっているということです。このようなスピンと電荷の分離を伴ったべき異常というのが、朝永・Luttinger 液体の大きな特徴です。ここでは、いわゆる量子臨界現象が起こっており、その結果いろいろな物理量に異常が生じます。例えば種々の相関関数、あるいは感受率といわれているものの温度変化、周波数変化、磁場変化、電圧変化に、こういった臨界現象を反映した「べき異常」が現れるわけです。

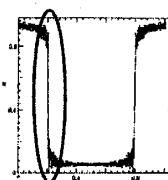
1990年前後から
理想的な1次元系: 数多く合成! 特に強相関
量子効果の解明を!

低エネルギーの臨界現象の正確な記述
異常な相関関数(べき異常)

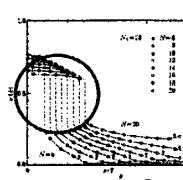
Recall 1次元電子系
厳密解: ベーテ仮説法
But スペクトルのみ!
How to describe universal behavior?

[Slide 17]

数値計算 アプローチ **1次元電子相関モデル Hubbard model**

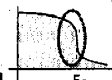


Imada et al.
 $U/t=4$ 130電子/160格子点
Monte Carlo



Ogata-Shiba
 $U/t=\infty$ 28格子点
Bethe wavefunction

べき異常?
数値手法
鍵: ユニバーサル



E_F

[Slide 18]

[slide 17] 先ほど述べましたように、理想的な1次元系が数多く合成されてきて、種々の量子効果を観測することが可能になっています。特に強い相関を持つ領域に興味深く、逆にその取り扱いが難しくなっています。これを扱うには、低エネルギーの臨界現象を正確に記述する必要があります。そのためには異常な相関関数、すなわち「べき異常」型の相関関数をうまく記述しなければなりません。ここで思い出して頂きたいのは、1次元電子系では、多体問題であるにも関わらず、場合によっては厳密解が存在するという事実です。今考えている1次元電子系でも厳密解は実際存在するのですが、そういった厳密解の方法というのは相関関数の計算にはむいておらず、スペクトルのみ計算出来る方法になっています。厳密解での相関関数の計算というのは、いままなかなか解決できない永年の notorious な問題になっているわけです。ではそれをどのように克服して、universal behavior を記述したらよろしいかということです。まず考えられるのは、近年急速に発達している計算機をフルに利用した、計算物理によるアプローチです。

[slide 18] これは10年位前になりますが、今田さんや小形さんたちのグループによって行われた数値計算の結果です。先ほど述べた運動量分布関数の計算を、1次元相関電子モデルの典型である Hubbard モデルに対して行ったものです。左が Monte Carlo で160格子点を取ったもの、右が28格子点で Bethe 波動関数と呼ばれる厳密解の波動関数を使って数値計算したものです。見て頂いたらわかるのですが、全体のかたちはうまく出ているのですが、フェルミ面を見ると、特に左の Monte Carlo の場合は、Fermi 液体と同じようにあたかもジャンプがあるように見えています。小形さんたちは、相互作用の無限大の極限での数値計算結果からべき異常を帰結しましたが、一般の相互作用では計算は、はなはだ困難となっています。このように、数値的手法は高エネルギーからのアプ

ローチですので、低エネルギーの部分の universal な性質を調べることは、やはりどんなに精度が上がったとしても難しいものです。したがって、弱相関から強相関までのクロスオーバーをどのようにうまく記述するかということが、依然として問題として残されています。ここで思い出して頂きたいことは、朝永・Luttinger 液体に関係するような低エネルギー励起は臨界現象を示すということです。ですから、朝永先生の仕事にもありますように、その性質は連続的な場の理論で記述されると期待されます。実は、このような臨界現象を記述する理論の枠組みが、以下に述べる共形場の理論と呼ばれるものです。共形場に関しましては、梁さんに基研のラウンジでいろいろと教えて頂きました。

2005 基研研究会
「学問の系譜」

Conformal Field Theory

臨界現象の基礎理論

謝辞: 梁成吉
ラウンジでの講座
with coffee



[Slide 19]


共形場の理論 Conformal Field Theory

素粒子 弦理論の基礎

1980年代後半 超弦理論

Belavin-Polyakov-Zamolodchikov

2次元共形場の理論



相転移: 臨界現象

2次元古典系: 臨界現象のカタログ

1次元量子系: 朝永・ラティンジャー液体

[Slide 20]


[slide 19,20] 釈迦に説法になるとまずいので簡単にスキップしますが、素粒子の弦理論の基礎として、特に 1980 年代後半から 2 次元共形場の理論が発展してきました。共形場の理論は弦の時間発展で得られる 2 次元世界面の物理を記述するものですが、われわれの対象としている物性物理とか統計物理では、これが相転移の臨界現象に現れます。2 次元古典統計系の場合には、実はこの共形場理論で臨界現象のカタログが出来上がっておりまして、1 次元量子系の場合は、いま問題にしている朝永・Luttinger 液体などがその対象になってきます。

共形場の理論 共形不変性を持つ場の理論

2次元相転移点 相転移距離 ξ 無限大

長さのスケールなし
臨界現象

スケール不変性 共形不変性 局所的スケール変換



1+1次元
無限次元の対称性
2次元共形場の理論

[Slide 21]

2次元座標 $z = x + iy$

共形変換: 任意の解析変換

$T(z): z \rightarrow f(z)$

7-11モード: L_n

ピラソロ代数

$$[L_n, L_m] = (n-m)L_{m+n} + \frac{c}{12}(n^3-n)\delta_{n,m}$$

無限次元リー代数

強力な数学手法: 臨界現象の解析

◇セントラルチャージ c ユニバーサリティ

◇共形次元 Δ 共形変換に伴う重み 臨界現象の記述

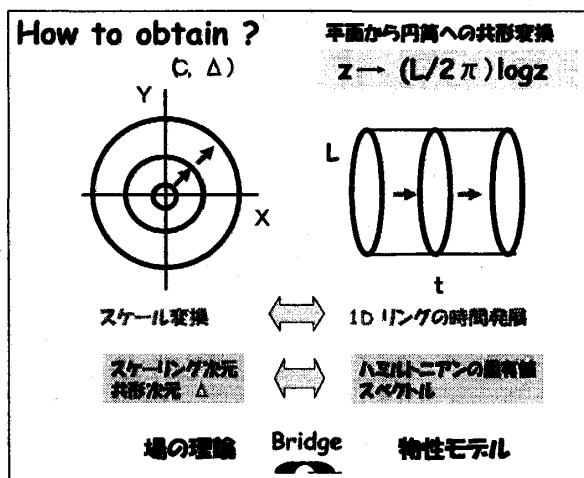
相関関数の決定

[Slide 22]

[slide 21] さて、臨界現象にどのように共形場の理論が現れるか眺めてみます。まず 2 次元相転移点を考えると、相関距離がどんどん長くなっていったら臨界点直上ではこれが無限大に発散してしまいます。したがって、長さのスケールがなくなり、これが臨界現象を引き起こします。よく知られていますように、そういった長さのスケールがない系では、スケールを変えても何も変わらないという「スケール不変性」が現れます。それをもう少し局所的にやっても物理は変わらないということで、局所的スケール不変性であるところの共形不変性が現れるわけです。右側に示した共形変換というのは、2 次元では無限個の種類がありますので、2 次元の共形不変性は無限次元の対称性になっています。このことが 2 次元共形場理論における強い数学的手法の源となっています。

[slide 22] この無限次元の対称性はどうやって表したらよいかということですが、いま、2 次元の座

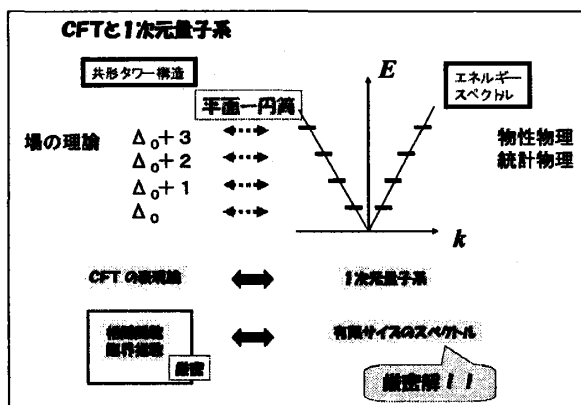
標を $z = x + iy$ と組むことにします。共形変換が任意の解析変換であるということを考えると、いろいろな種類の座標変換が考えられます。その変換のフーリエモードを考えると、無限次元であるためフーリエモードが無限個出てくることになります。今、フーリエモードを L_n とすれば、この L_n という生成子の満たす交換関係がピラソロ代数という無限次元のリー代数を構成し、これが先ほど言いました臨界現象を解析する強力な数学的手法になります。この交換関係の右辺最後の量子異常項にセントラルチャージ c と呼ばれている数が現れています。これは統計力学ではたいへん重要な量になっており、臨界現象のユニバーサリティクラスを分類してくれるものです。共形場理論にはもう1つ重要な量がありまして、それは共形次元と呼ばれているものです。スケール次元と同じものですが、共形変換すなわち局所スケール変換をした時に、どのように場が変換するかを表します。重要なことは、この共形次元が相関関数の臨界指数、すなわちべき異常性を決定することです。このような物理量が求まれば、臨界現象のクラスが特定できその性質が記述できるわけです。



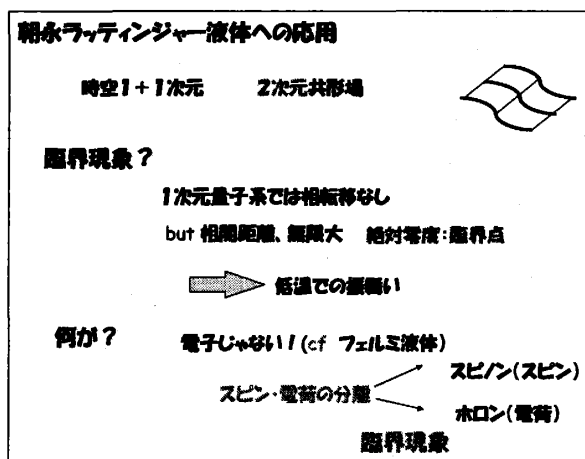
[Slide 23]

[slide 23] では、実際にはどのようにしたらよいとお話します。このような場の理論を、われわれの知っている物理系にどう応用したらいいかということです。実はここに示した簡単な変換がその橋渡しをしてくれます。図のような平面から円筒への変換を考えます。まず左側の図を2次元平面、右側を円筒だと思ってください。左図のリングはスケール変換によってどんどん大きくなっていくのですが、これを遠くからリングが近づいてきてリングがどんどん大きくなっているとみなします。そうすると、変換後の右図では、この変化はちょうど1次元リングが円筒に沿って時間発展していることに対応します。したがって、このような変換によって、2次元場のスケール変換が1次元のリングの時間発展に対応することになります。すなわち、スケール変換に対応する固有値であるスケール次元すなわち共形次元と、右側の1次元リングの時間発展を起こすハミルトニアンの固有値すなわちエネルギースペクトラムが1:1に対応することになります。このような簡単な変換なのですが、2次元の場の理論と物性物理に現れる1次元リングのモデルをうまく結びつけてくれるというわけです。

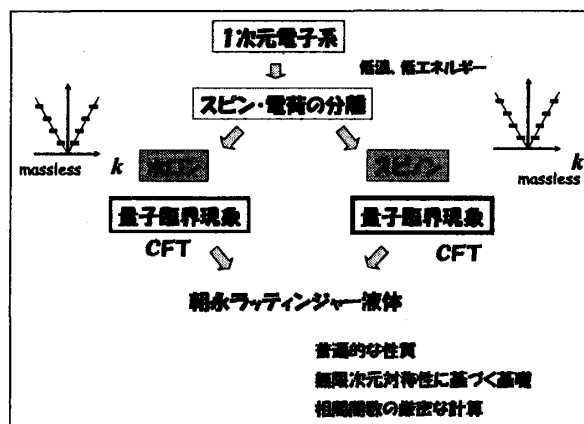
[slide 24] もう少し詳しく説明します。図の左側に2次元場の理論があり、そこにピラソロ代数で分類された共形タワー構造と呼ばれるものが現れます。それは先ほどの共形次元でラベル付けされるわけです。右図にはわれわれの考えたい1次元量子系があり、有限の長さの系を考えると離散的なスペクトラムが現れます。先ほどの平面と円筒の間の変換を考えると、左図のスケール次元すなわち共形次元と右図のエネルギースペクトラムが1:1に対応することになり、これはCFTの表現論と1次元量子系のスペクトラムが1:1に対応することを表しています。したがって、右側の有限サイズ系のスペクトラムを調べておけば、左側の相関関数の臨界指数などが求まるということになります。ここで思い出して頂きたいことは、われわれは以前から Hubbard model などの相関電子系に「厳密解」を持っていたということです。したがって、上記の関係を使えば今まで計算しにくかった相関関数の厳密解も得られることになります。



[Slide 24]



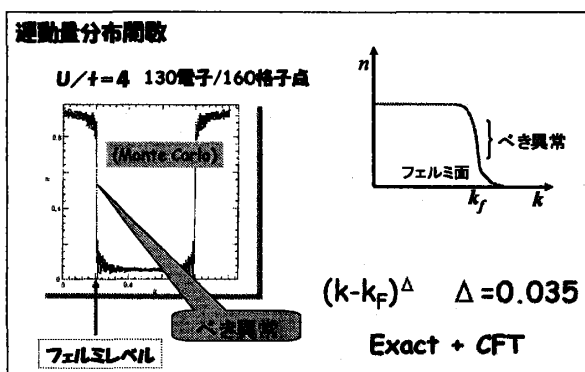
[Slide 25]



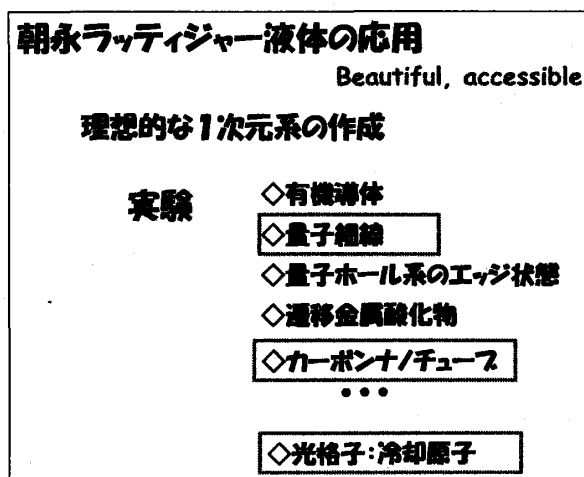
[Slide 26]

[slide 25] では、実際に朝永・Luttinger 液体に応用してみます。今、1次元量子系を考えているので時空 1+1 次元ということになり、「2次元」の共形場理論を応用できそうです。しかしながら、系が臨界現象を示さないと適用できないので、臨界現象を起こすかどうか判断しなければなりません。1次元量子系では、有限温度で相転移はないという有名な定理があります。しかしながら、相関距離は、温度を下げていくとどんどん長くなり、相転移は実際には起こらないのですけれども、絶対零度で発散することが可能です。すなわち、1次元量子系では、有限温度ではなくて絶対零度が臨界点の候補になるわけです。絶対零度に近い低温の振る舞いに注目するということになります。では、実際に臨界現象を起こすのは何かということですが、Fermi 液体では電子だったのですが、今の場合は電子ではありません。1次元電子系ではスピンと電荷の分離が起こり、それぞれのモードはスピノンとホロンと呼ばれることが多いですが、それぞれが別々の臨界現象を起こすということになっています。

[slide 26] 以上のことをポンチ絵で描くと図のようになります。1次元電子系では低温、低エネルギーでスピン・電荷の分離が起こり、対応する励起スペクトルには massless のホロンとスピノンが現れ、それぞれが別々の共形場理論で記述されます。その2つをもう一度貼り合わせると、朝永・Luttinger 液体ができあがるという仕組みになっています。このように低エネルギーの普遍的な性質は、CFT の無限次元の対称性に基づいて記述することができ、相関関数の異常べき指数の厳密な計算なども可能になります。



[Slide 27]



[Slide 28]

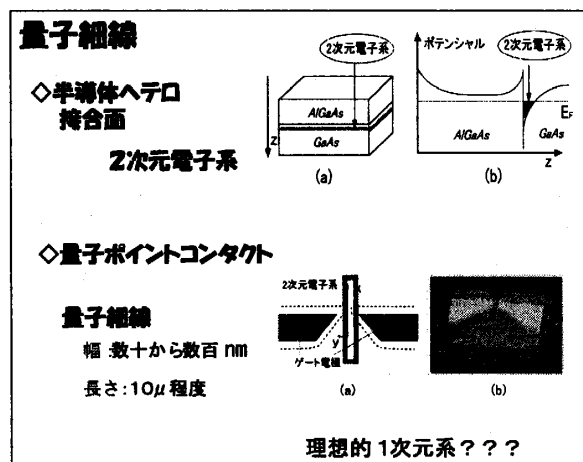
[slide 27] 1つの例として、先ほどふれた運動量分布関数を見てみます。図のように Monte Carlo で計算するかぎりでは、Fermi レベル付近はジャンプにしか見えません。しかし、実はこれはやはりべき異常であって、厳密解と CFT を組み合わせで求められた臨界指数は 0.035 というたいへん小さい

値です。これは現在の数値計算の精度でも、おそらく得られない値だと思います。このように、朝永・Luttinger 液体に関しては、朝永先生の先駆的な理論、さらに弱結合ボゾン化法、数値計算、CFTなどによって基礎的なことはほぼ確立しています。現在、その応用研究がいろいろとなされています。以下では、実験への応用としていくつかの例を紹介します。

[slide 28] 1次元系の面白い点は、以上述べてきた美しい数理的な構造が実際に実験で見られるということだと思います。ここでは時間がありませんので、量子細線、カーボンナノチューブ、光格子に話を限定します。光格子では1次元系としての実験はまだ十分とはいえませんが、最近の話題ということで紹介したいと思います。



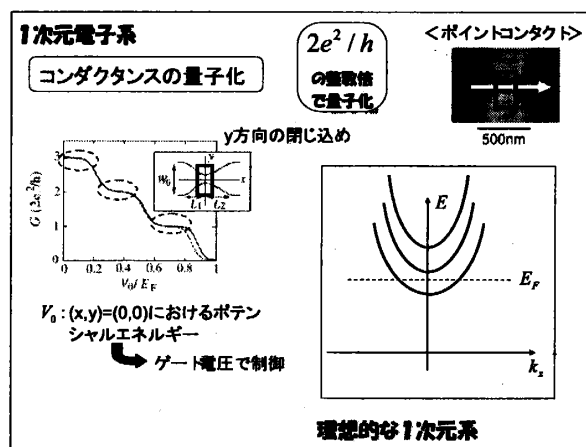
[Slide 29]



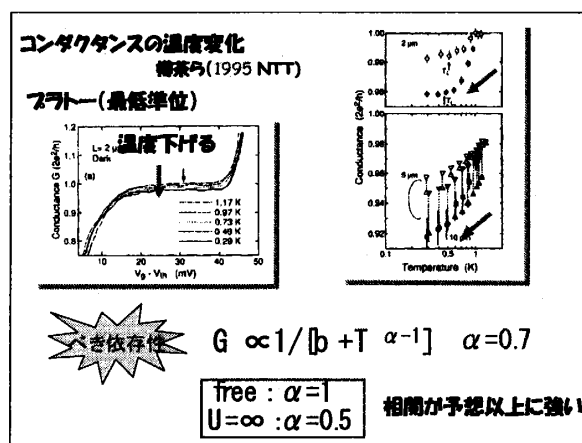
[Slide 30]

[slide 29] まず量子細線から始めます。まず量子細線はどうやってつくるかについて説明します。これには半導体のヘテロ構造というのを使います。ここに示したのはガリウム砒素とアルミニウムガリウム砒素を接合したもので、その接合の境界にポテンシャルのくぼみができて電子が閉じ込められます。ですから、右図のポテンシャルがへこんだところに2次元電子系ができるわけです。そういった2次元電子系を図のようにさらに両方からゲート電圧で絞っていき、四角で印をつけたあたりに1次元電子系が出来ることになります。これを量子ポイントコンタクトと呼びます。右がその顕微鏡写真です。左側に記してありますように、量子細線として、数十から数百ナノメートルの幅で長さが10ミクロン程度になっています。これが1次元系となっているはずなのですが、この写真でみる限り少しいびつな形なので、実際のところ2次元なのか1次元なのか0次元なのか、見た感じではわかりにくいです。

[slide 30] しかしながら、1次元性をチェックする方法があります。実は1次元電子系では、コンダクタンスが量子化されるという現象が生じます。右図に示した量子ポイントコンタクトにカレントを流してみると、量子ポイントコンタクトの部分に1次元電子系が何本実現しているかを調べることができます。左の図の上の方で楕円で囲んだところは、コンダクタンスが $2e^2/h$ を単位として3に量子化されています。その時、右下の図では、3本の1次元電子系がフェルミ面に存在します。さらに、量子ポイントコンタクトのゲート電圧を変化させるとポテンシャルエネルギーが変わるので、右下図のスペクトルで化学ポテンシャルを調節することができます。例えば化学ポテンシャルを持ち上げてみると、コンダクタンスは左図のように2に量子化されて、それに応じてフェルミ面には2本の1次元系が現れます。もう少しポテンシャルを上げてみると、最後には1本の1次元系がフェルミ面にかかってきて、コンダクタンスは1になります。このように1次元電子系では $2e^2/h$ の整数倍でコンダクタンスが量子化されるという特徴があります。一番最後の場合には、1次元系が1本のみ有効であるということが分かり、いびつな形状をしていたのですけれども、ほぼ理想的な1次元電子系を実現していると考えられます。

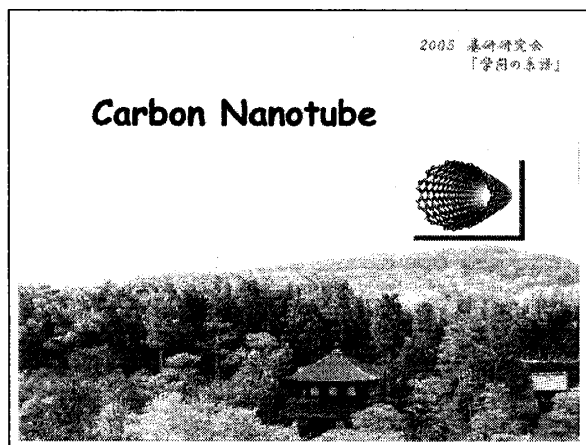


[Slide 31]



[Slide 32]

[slide 31] 量子細線に関する先駆的な実験が、もう 10 年位前になりますが、当時 NTT におられた樽茶さん（現在、東大の物工に移られています）のグループで行われました。前のスライドの一番下のプラトーの部分でコンダクタンスの温度変化を測ると、下図に書きましたように、 $T^{-\alpha}$ というべき依存性が出てきます。その臨界指数は $\alpha = 0.7$ くらいだというわけです。この 0.7 というのは何かというと、自由電子では $\alpha = 1$ 、相互作用が無限大の場合が $\alpha = 0.5$ なので、0.7 という値はかなり電子相関が強いということを意味しています。それまでは量子細線はバリスティック伝導を示す自由電子のように多くの場合扱われていました。このような実験を通して、このような量子細線がかなり相関の強い朝永・Luttinger 液体に分類されるということがわかったわけです。ほぼ同じ時期に、量子ホール系のエッジ状態のトンネルコンダクタンスにも、きれいにべき異常が観測されました。最近では、カーボンナノチューブの実験で高い精度でべき依存性が測定されています。以下で、カーボンナノチューブについて手短に紹介します。



[Slide 33]

カーボンナノチューブ

1991 NECの飯島 発見
 C_{60} の副産物
天然の量子細線

2次元グラファイトを円筒状に丸めた物質

分野	応用
エレクトロニクス	トランジスタ ダイオード
電子源	ディスプレイ
ナノテクノロジー	STM, AFMの探針 ナノスケール加工機械

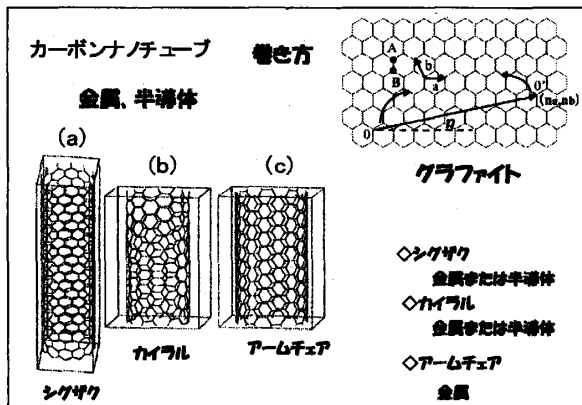
直径 7~300Å
長さ 10μm

— 2nm

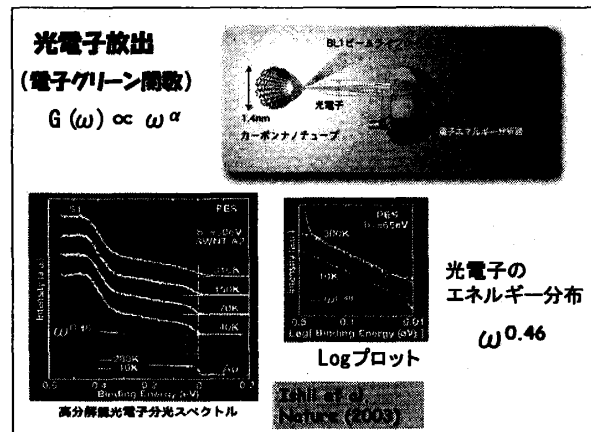
[Slide 34]

[slide 32,33,34,35] よく知られていますように、カーボンナノチューブは NEC の飯島さんによって 1991 年に偶然発見されたもので、天然の量子細線と呼ばれているものです。2次元グラファイトを円筒状に丸めた物質であって、エレクトロニクス、電子源、ナノテクノロジー、いろいろなものに応用されています。直径は 7~300 オングストローム位で、長さが 10 ミクロン位です。ここの絵に示したように、カーボンナノチューブはグラファイトをくりっと巻くのですけれども、その巻き方によっていろいろなパターンがあって、金属になったり半導体になったりします。これは 3つのカテゴリーに分かれていまして、それぞれジグザグ、カイラル、アームチェアなどという名前が付いています。細かいことはよいとして、ジグザグとカイラルの場合は、金属になったり半導体になったり、巻き方によってその性質が異なります。アームチェアの場合は、どのように巻いても常に金属になるということがわかっていますので、金属相での朝永・Luttinger 液体を調べる時にはアームチェア型が

よく使われます。

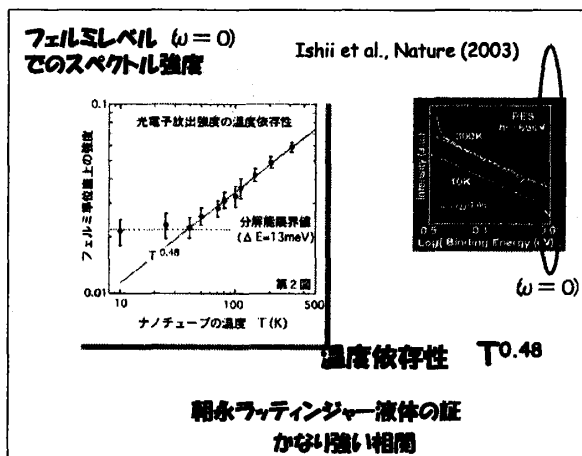


[Slide 35]



[Slide 36]

[slide 36,37] カーボンナノチューブに関しては、すでに多くの実験結果が得られているのは、みなさんご存じだと思いますので、その中で最近のきれいな実験を1つだけ紹介します。それは光電子放出と呼ばれているもので、理論の言葉で言うところ電子グリーン関数 $G(\omega)$ の ω 依存性を測定することに対応しています。いま、放射光を当てて光電子放出スペクトルを見るのですが、その時のエネルギー ω と強度をプロットしています。図に示したのは、300 ケルビンから 10 ケルビンまでの温度範囲での強度の ω 依存性です。これを少し拡大し、300 ケルビンと 10 ケルビンのデータに対して横軸を $\log \omega$ でプロットしたものが右図です。ちょっとわかりにくいですが、エネルギー依存性は $\omega^{0.46}$ というべき異常を示します。この結果は一昨年、都立大学とその共同研究グループによって発表されたものです。(「引用図は広島大学谷口研究室ホームページ <http://home.hiroshima-u.ac.jp/srphys/> より転載」)。

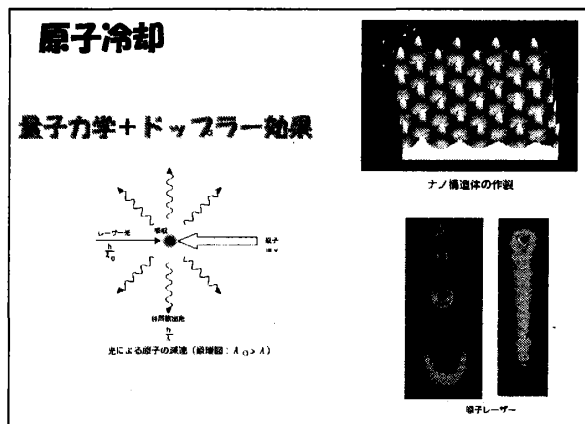


[Slide 37]



[Slide 38]

通常フェルミ液体では、低温で光電子スペクトル強度は ω 依存性がなくなるので、この $\omega^{0.46}$ という依存性は、 $\omega=0$ 付近に強度にへこみが現れ、強い相関があることを示しているわけです。次のスライドでは、これと相補的にフェルミ面の真上 (ω がゼロ) で温度変化を測ってみたものです。それが左図に示されています。この強度の温度変化もべき依存性に従っていて、その指数は 0.48 で、先ほどの 0.46 に近い値になっており解析に矛盾がないことがわかります。ですから、やはりカーボンナノチューブも低エネルギー領域では自由電子の描像がよいわけではなくて、朝永・Luttinger 液体として扱う必要があり、しかもかなり相関が強いということがわかったわけです。以前盛んに行われていた有機導体の実験では、べき依存性をなかなかきれいに観測できず、その解釈も統一的なものではありませんでした。現在では、ほぼ理想的な 1 次元系としての量子細線、量子ホール系エッジ状態、カーボンナノチューブなどではっきりと朝永・Luttinger 液体の証が観測されるようになりました。



[Slide 39]

レーザー冷却

量子力学的効果とドップラー効果
原子気体の温度を下げる

6×10^{-8} K の低温まで到達可能

冷却された原子集団
Rb, Na, Li, H

↓

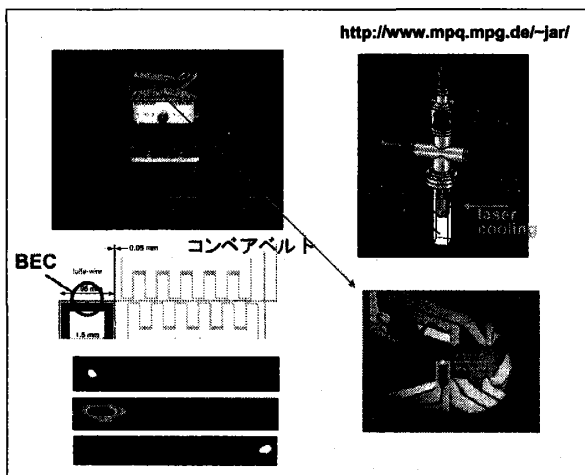
理想的な量子力学系

ボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)

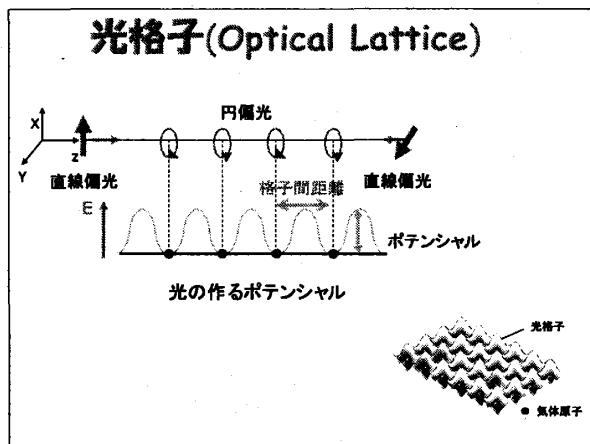
[Slide 40]

[slide 38,39,40,41,42] 以上の内容は、すでに実験的にも確立されたものです。最後に、関連した話題として冷却原子ガスについて、少しだけ述べます。これについての活発な研究は、みなさんよくご存じのことと思います。

原子冷却というのは、レーザーを原子に当ててどんどん冷やす技術で、これを用いてナノ構造体をつくってみたり、原子レーザーへ応用するなど、多彩な応用研究が行われていますが、やはり物理をやっている人が一番興味を示すのは、Bose-Einstein 凝縮だと思います。冷却された原子ガスが Bose-Einstein 凝縮を示す最近の実験については、みんなご存知のことと思います。



[Slide 41]

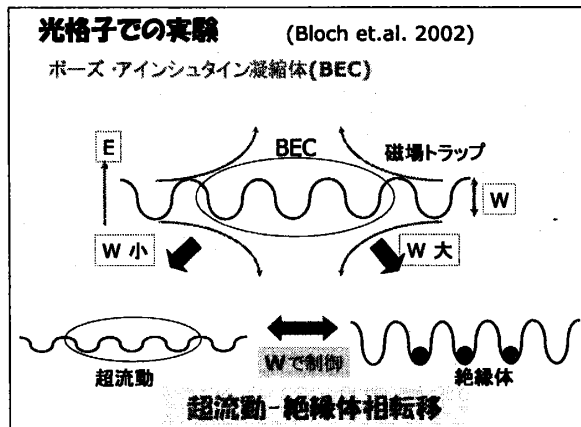


[Slide 42]

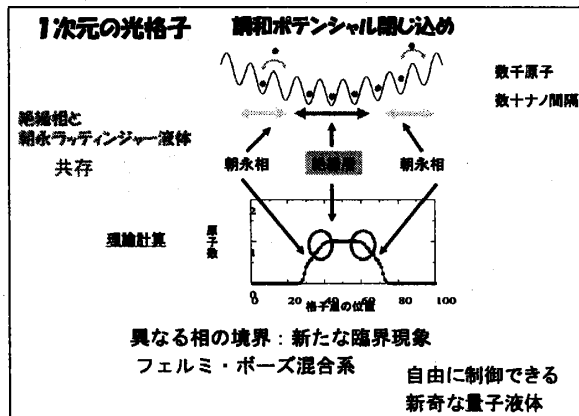
もともと、このような実験は、冷却装置、測定装置など含めると実験室1つ分の大きさが必要でしたが、最近の発展の一つとして驚くべきことは、1つの部屋でやっていた実験が図に示したような小さいチップ(アトムチップ)でできるようになったことです。この図はマックスプランク研究所のヘンシュ(今年のノーベル賞)のグループの実験です。まだ、このようなことは世界のどこでもできるわけではなく、限られてはいるようです。左上の図にアトムチップを示しましたが、コインと比較してもその小ささがわかると思います。矢印で示したところに Bose-Einstein 凝縮体をつくります。右下にその拡大図を示しました。ハエがとまっているのがわかると思います。ハエの先に白いものがありますが、ここに Bose-Einstein 凝縮体をつくって、さらにそれをコンベアで右の方に運ぶことができるようになっています。これまで想像できなかったような技術が急速に発展しているということです。

さらに、原子を冷やして閉じ込めるだけでなく、そこに光で変調をつくって、人工的な格子を

つくることのできるようになっていきます。これは光格子と呼ばれています。まず原子を空間的に閉じ込め、さらに光の作る周期的ポテンシャルで人工的な格子を作りますが、光の波長を変えることで格子間の距離も自由に変えることができます。このようなことが実際できるようになっています。



[Slide 43]

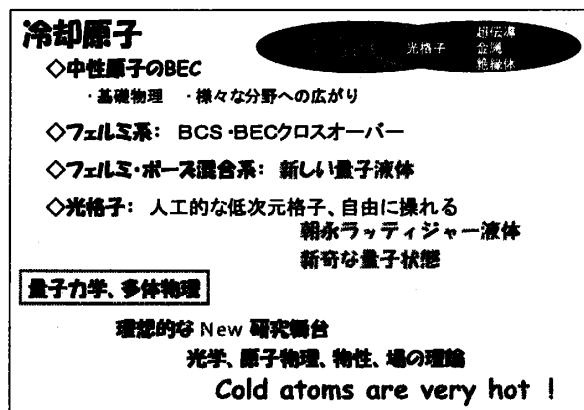


[Slide 44]

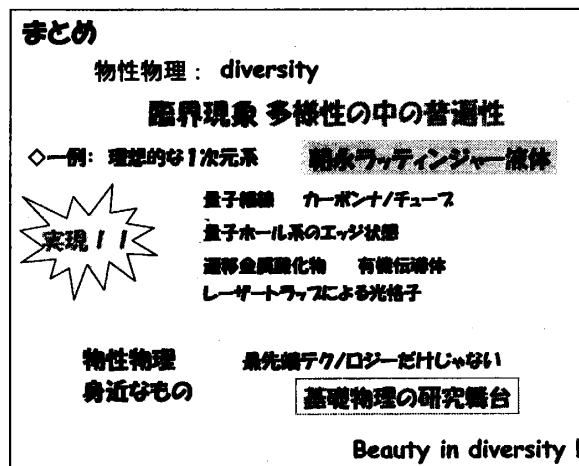
[slide 43] このような光格子の研究の中で著しいものとして、2002年の Bose-Einstein 凝縮体とモット絶縁体の間の相転移の実験があります。レーザー冷却で実現した Bose-Einstein 凝縮体に、光の変調を加えて結晶格子のようなものを作ってみると、何が起こるかということです。ここで変調ポテンシャルの強さを W とすると、 W が小さい場合は、もちろん Bose-Einstein 凝縮が起こり超流動相にあります。が、 W を大きくして原子を動きにくくすると、最終的に絶縁体に転移します。この絶縁体は電子相関によって生じた、いわゆるモット絶縁体です。実際にこのような超流動-絶縁体の相転移という現象が観測されたことは、従来の物性物理のセンスからすると非常の驚くべきことだと思います。

[slide 44] もちろんこういった研究において、1次元の光格子も実現できるようになっています。例えば図のように調和ポテンシャルでまず原子を閉じ込めて、そこにさらに周期的変調を行うと、図のようなかたちの系が出来上がります。真中のあたりは粒子密度が高いのでモット絶縁相になっており、もう少し端っこの方は粒子密度が低く朝永・Luttinger 液体相となり、2つの相が空間的に共存することになります。今までの物性実験では考えられなかったような系が、かなり自由に作成できます。2つの境界相には、新しいタイプの臨界現象が現れるとの指摘もなされています。

このような実験は、これまで主にボゾンに対してなされているのですが、フェルミオンに対しても実験が進んでおり、また Fermi と Bose の混合系も実現できるようになっているということです。このような新しい人工系で新奇な量子液体が観測されるのではないかと期待も高まっています。



[Slide 45]



[Slide 46]

[slide 45] このように冷却原子に関しては、Bose-Einstein 凝縮だけではなく、光格子上の Fermi 系

や Fermi-Bose 混合系などで、これまでの固体物理には見られないような新しい量子状態が実現できるのではないかと期待されます。これらは、量子力学や多体問題に対する理想的な研究舞台を提供し、異分野交流の新たな場となる可能性があります。Cold atoms はたいへん hot な話題になっています。



[Slide 47]

[slide 46,47] 以上をまとめますと、ここでは物性物理の多様性の中にみられる普遍性の典型例として、朝永・Luttinger 液体の話をしました。数学的にたいへんきれいな理論であり、さらに最近ではそれが実験でもきれいに観測されるようになってきました。物性物理学、統計物理学というのは身近なものを研究対象にしており、最近ではともすると最先端テクノロジーに偏りをみせる傾向がありますが、そういった中に基礎物理の美しい研究舞台が拓けていることを強調したいと思います。

最後にこのお2人の先生に感謝して、話を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

討論

佐々 : ありがとうございました。何か質問とか、コメントなどがありますでしょうか。なかなかみなさん、おとなしいのですよね。昨日から聴いていると、こういう場所で質問をしづらいでしょうか。じゃあ坂東さん。

坂東 : みんな原子の話ですね。

川上 : 最初の方の話は電子に関するものです。朝永・Luttinger 液体というのは、固体中の電子を対象とした理論ですが、最後の部分の cold atoms における話題は、そのような多電子で見られる現象を、光格子上の原子でも真似して実現できるようになっているということです。

坂東 : 私などは Bose-Einstein 凝縮なんて当たり前で、何がうれしいのかと思っていたのです。

川上 : Bose-Einstein 凝縮は、例えばヘリウム4で既によく知られており、以前から実現されています。ごく最近まで、これ以外の原子では実現されていなかったのですが、ルビシウムとかナトリウムとかといったアルカリ原子ガスでも、 10^{-8}K の温度にまで下げていけば粒子密度を上げていって凝縮が実現できるようになったということだと思います。Bose-Einstein 凝縮の概念そのものは新しいわけではなくて、いままでは現実的に考えられなかったような、原子ガスがレーザー冷却によって凝縮できたということが、Bose-Einstein の面白いところだと思います。だから Bose-Einstein 凝縮に関しては、やはりレーザーテクノロジーの発展が一番特筆すべきことだと思います。そこから先に、今度は光で格子をつくったりするという技術が登場しましたが、これはもう少し新しい発展だと思います。

坂東 : そうということというのは、電子レベル、原子レベルじゃなくて、もっと別のあれでも考えられますか。例えばクォークだとか。

川上 : 電子よりさらに小さい世界の話ですか。それは、よくわかりません。ただ、ここでの話は、逆に粒子を大きくしていった時の話ですね。もともと電子系の話をしましたが、そこでは量子効果がよく見えていました。電子系ではもちろん量子力学が重要となりますが、アルカリ原子のように大きくなってきた場合、どこまで量子効果が見えるかという問題が、逆に面白いのではないかと思います。ヘリウムは原子であるのに、電子と同じように量子効果が重要で、ヘリウム4とかヘリウム3では、フェルミオン、ボゾンの性質がよく現れていたわけです。いまのルビシウムとかのさらに大きい原子の気体でも量子効果が効くような条件に到達でき、凝縮できるようになったということです。クォークというのは、その逆の方向での話題ですけども、それに関してよくわかりません。

国廣 : 今のことについては、クォークでカラー超伝導というのが10年位やられていまして、カラー超伝導のギャップというのを計算してみると、有効模型、カイラルモデル、NJL モデルとかから出発して、フィールツ変換をして、 $q\bar{q}$ interaction を qq interaction に変えてやると、その時

のフェルミエネルギーと比べて、ギャップがだいたい 10% とか、数 10% あります。ですから非常に強相関になっています。そうすると、そこでは BCS-BEC cross over みたいなことも考えられていて、最近、それこそ quark matter 中での BCS から Bose-Einstein condensation (BEC) への cross over というのが問題になっています。

佐々：よろしいでしょうか。他にありますか。

非常に上手に話をされたので、どこに謎があるのかが見えなかったのです。ある意味ではもう朝永さんの最初の話に尽きていて、後はそこからずっと熟成していった最後は実験まで見えましたという印象を持ちました。それに対して、いや、実はそうではないんだ、こういうところがパズルだ、こういうところがまだ基礎的な問題に絡んでいくのだ、こういう現象にまだ未解決で大事なところがあるのではないかと、そういうことがあったら教えて頂きたいのです。

川上：前半の話は、わりと淡々と話したので分かりにくかったかもしれません。朝永先生のやっておられた低エネルギーの理論というのは、やはり weak coupling からの理論だと思います。1980 年代半ばから問題になってきたのは、強相関の扱いをどうしたらよいかということです。強相関の扱いはやっぱり難しく、数値計算などでアプローチされました。いまでは当然のようになっていますけれど、弱相関から強相関はやっぱりクロスオーバーだから弱相関の性質は強相関でも成り立つ、また相転移は低次元だから起こらないということになっています。けれども、やはりその当時、1980 年代半ばから 90 年代最初のころは、強相関は違う相になっているのではないかという見方もありました。そのような問題に対して、どのようにアプローチしたらいいかということです。朝永先生の方法でやってしまうと weak coupling のアプローチになってしまい、あるいは同じことですが弱結合摂動論でやると、やっぱり弱結合は朝永 liquid になっているという結論になります。じゃあ、強相関まで含めて統一的に記述するという問題が、なかなか解決できなかったわけです。そのような強相関領域も含めたクロスオーバーに対して、CFT がその基礎にあれば、臨界現象を基にきっちりとした記述ができるということです。その部分は、講演ではあまり強調しませんでした。

川崎：いまのは 1 次元というお話でしたね。でも最近、ちゃんとよく調べていないのですが、高次元でも、量子臨界現象という言葉をよく聞くのです。ITC なんかに関連して、それは温度じゃなくてパラメーターですね。そういう話はどのようにつながっていくのでしょうか。

川上：臨界現象という意味では、高次元でも同じ話になります。ここでは 1 次元量子系の話をしたのですが、臨界現象に対しては共形場理論は高次元でも使えます。ただし、2 次元系と高次元系の違うところは、2 次元系の共形不変性というのがたいへん強い条件になっていて、それがいろいろな臨界指数まで決めてしまう位強い対称性であることです。高次元の臨界現象になってくると、同じように共形不変性というのはありますけれども、それがそんなに強い制限にはなっていないのです。スケール不変性とそれにちょっと毛の生えた程度の条件になっているので、あまり有効ではありません。2 次元共形場理論の強いところは、そういう無限次元の対称性で現象を絞り込んでいって、他に何も使わなくても、例えば臨界指数を全部決定してしまうくらい強い方法になっています。まとめると、臨界現象という意味では、高次元でも共形不変性は成立します。

佐々：時間がないのですけれども、もう 1 つだけ、私が、CFT が非常に強力な武器になっているわけですが、例えばカーボンナノチューブの実験結果の説明に CFT が摘要できるというのは、非常に驚異的な感じがするわけです。高エネルギーのリミットで世界の記述が単純になって CFT が使える、というのはまあそうかなとも思います。しかし、ごちゃごちゃした物質の中に CFT が埋まっているというのは、ユニバーサリティだと言えばひと言なのかもしれませんが、そのひと言で片づけていいものなのかどうか。コメントはありますでしょうか。

川上：低エネルギー以外の物性にも、例えばエネルギースケールを変えていくと多様で面白い性質があらわれます。物性のおもしろさというのは、ユニバーサリティだけではないと思うのです。多様性、すなわちダイバーシティというのがたいへんおもしろいことだと思います。ダイバーシティとユニバーサリティというのは、例えば温度を変化させたときに出てくるのだと思います。ダイバーシティというのは高エネルギー部分を反映しており、高い温度で見ると個々の結晶の性質をいろいろと反映したおもしろいことが起こっています。どんどん温度を下げていくと、長波長が重要になってきて、そういった多様性が見えなくなって、最後には、同じものに収束するわけではないのですけれども、ユニバーサリティで分類される大きな枠組みの中に落

ち込んでいくということなのです。ですから、それが実際に落ち込んでいけるのか、すなわち物質に特有のエネルギースケールよりも高温から下げていった時に、結晶構造が見えなくなり最後にそういうユニバーサリティクラスにうまく分類できるかどうかという問題は、やっぱりそんな簡単な問題ではなかったのだと思うのです。実験で、このようなユニバーサルな性質が、ごちゃごちゃした物質で測れるのかというと、そんなに簡単ではなかったと思います。カーボンナノチューブなり量子細線などができ、実験の精度が上がるようになって初めて可能になりました。これらの物質が朝永・Luttinger 液体に分類できるということがわかったのは、そんなに昔ではないと思います。

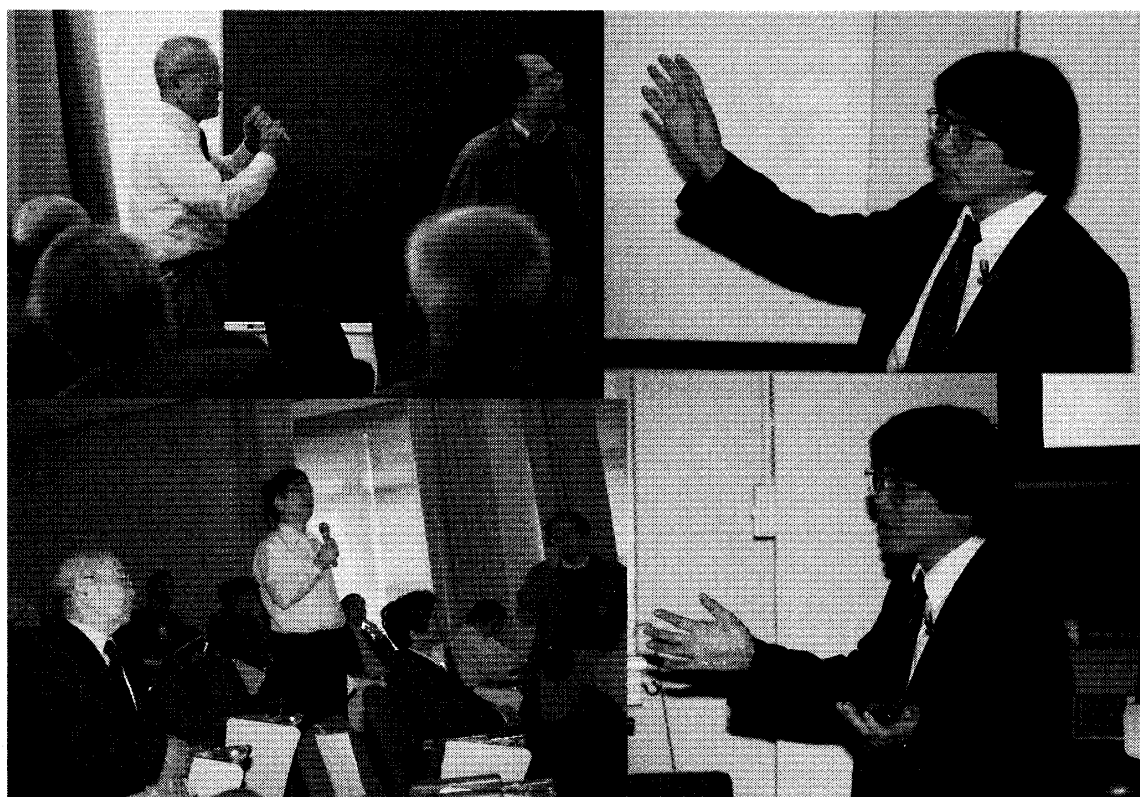
佐々：じゃあ最後に1つだけ。

小貫：1次元というのは非常に特殊な場合なので、2次元、3次元の量子臨界現象というのは、どこまで認識されて、どこまでわかっているのでしょうか。

川上：それが、ちょうどいま研究されている物性物理の強相関電子系の一番ホットなトピックスだと思います。ここでの1次元物質以上にごちゃごちゃした希土類系とか遷移金属化合物系で、いろいろなパラメタを外圧とか磁場でずっと振っていくと、例えば磁性が壊れるところの臨界点、あるいは超伝導が壊れるところの臨界点など、いろいろな臨界点が現れてきます。その分類が、まだきっちりできているとは。。

小貫：それは実験的事実で、理論的に。

川上：それは実験的事実ではありますが、それに関する理論がきっちりできているわけではありません。例えば、磁性が消えていって最後になくなった点で、その真上から温度を下げていった時の臨界現象は何か、また、磁性と超伝導がちょうど重なって消えるところの臨界現象は何かという問題は、完全にわかっているわけではありません。ですから、そういう実験的事実がたくさんあり、それに関して理論研究が行われているという現状です。



ph08

川崎, 佐々, 川上, 巽, 国広, 小貫